بررسی اثر دمای بستر و اپوکسی در هنگام نصب برروی مقاومت چسبندگی ورق‌های GFRP بااستفاده از دو آزمون جدا کردن با کشش (Pull-off) و با پیچش (Twist-off)*

مقاله پژوهشی

پیمان ایمانی جاجرمی[۱] محمدرضا توکلی‌زاده[۲] عباس یوسفی[۳]

چکیده *استفاده از ورق‌های پلیمر مسلح با الیاف (FRP) به‌دلیل مزایای بسیار زیاد آن‌ها به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح به‌سازی سازه‌های بتنی شناخته شده‌است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر دمای سطح بستر و هم‌چنین اپوکسی در بازهٔ ۵ تا ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد برروی مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP با الیاف شیشه‌ای به بستر پایه سیمانی است. به همین منظور، از دو آزمون نیمه‌مخرب جدا کردن تحت کشش (Pull-off Test: POT) و جدا کردن تحت پیچش (Twist-off Test: TOT) بهره گرفته شده‌است. نتیجه‌های این پژوهش براساس تحلیل و بررسی داده‌های ۲۸۸ آزمونه از ۳۲ نمونهٔ ساخته‌شده گزارش شده‌است. به‌منظور درک بهتر اثر دمای سطح بستر و چسب اپوکسی و هم‌چنین برهم‌کنش آن‌ها، برروی مقاومت چسبندگی ورق‌های GFRP، نتایج به‌دست‌آمده بااستفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تحلیل واریانس نیز (ANOVA) قرار گرفت. براساس این پژوهش، بیشترین مقاومت چسبندگی مربوط به نمونه‌هایی با دمای سطحی و اپوکسی ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد بود که نسبت‌به نمونهٔ مبنا (دمای سطحی و اپوکسی ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد)، برای روش POT و TOT به‌ترتیب، ۳۶ و ۲۴ درصد افزایش را نشان داد. هم‌چنین، نتیجه‌ها نشان داد، اثر منفی دمای سطح بستر را می‌توان تاحدی با افزایش دمای اپوکسی جبران کرد. افزون بر این، تحلیل درون‌یابی غیرخطی انجام‌شده برروی نتیجه‌ها حاکی از وجود یک رابطهٔ نمایی بین مقاومت‌های چسبندگی به‌دست‌آمده از دو روش POT و TOT بود.*

واژه‌های کلیدی مقاومت چسبندگی، دمای سطح بستر، دمای اپوکسی، آزمون جدا کردن با کشش (Pull-off Test)، و آزمون کشش با پیچش (Twist-off Test)، ورق GFRP.

مقدمه

ترمیم و به‌سازی سازه‌های بتنی از دیرباز به‌عنوان یکی از چالش‌های مهندسان عمران شناخته شده‌است. ازاین‌رو روش‌های مختلفی از جمله استفاده از غلاف‌های بتن‌آرمه یا فولادی و پیش‌تنیدگی به‌منظور بهبود رفتار سازه‌ها ارائه شده‌است. چسباندن ورق‌های پلیمر مسلح با الیاف (FRP) به سطح کششی بتن و یا استفاده از آن به‌عنوان دورپیچ ستون‌ها یکی از روش‌های نوین و پرکاربرد در مقاوم‌سازی اعضای بتن‌آرمه است. از مهم‌ترین عواملی که در تقویت سازه‌های بتن‌آرمهٔ تقویت‌شده با ورق‌های FRP باید بدان توجه کرد، بحث مقاومت چسبندگی و جلوگیری از جداشدگی زودهنگام ورق از بستر است [1,2].

در کاربردهایی که از چسب به‌عنوان وسیله‌ای برای ایجاد پیوستگی بین ورق و بستر استفاده می‌شود، تنش‌ها از طریق دو سازوکار مختلف به لایهٔ تقویت‌کننده منتقل می‌شوند. این دو سازوکار عبارتند از چسبندگی شیمیایی و قفل‌شوندگی مکانیکی [3,4]. چسبندگی شیمیایی، نتیجهٔ واکنش‌های شیمیایی بین چسب، الیاف و سطح بتن است [5,6]، درحالی‌که قفل شوندگی مکانیکی، حاصل نفوذ چسب به درون منافذ سطح بتن و توانایی تَرکنندگی سطح بستر توسط چسب است [7].

به‌طور کلی از سه نوع مصالح FRP برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه استفاده می‌شود که شامل ورق‌های با الیاف کربن (CFRP)، الیاف شیشه (GFRP) و الیاف آرامید (AFRP) می‌باشد [8]. ورق‌های GFRP به‌دلیل در دسترس بودن و هزینهٔ پایین تولید در مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه در محیط‌های خشک کاربرد بسیار زیادی دارند. برای نمونه، چوته و آگراوال [9] نشان دادند، ورق‌های GFRP ظرفیت باربری را بین ۲۲ تا ۴۳ درصد افزایش می‌دهند. رفتار ستون‌های بتنی تقویت شده با ورق‌های GFRP توسط ژانگ و همکاران [10] نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بسیار مطلوبی گزارش شد.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱۰/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۲/۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری سازه، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۳) مدیر عامل مؤسسهٔ تحقیقاتی پر طاووس، شرکت لعاب مشهد.
Email: drt@um.ac.ir

عوامل گوناگونی در مقاومت چسبندگی و هم‌چنین پیوستگی سطح تماس بین بستر بتنی و الیاف تأثیرگذار می‌باشد که می‌توان به عوامل محیطی، فیزیکی و شیمیایی اشاره کرد. در این میان، دمای سطح بتن و اپوکسی در زمان عملیات نصب از عوامل بسیار مؤثر در چسبندگی ورق‌های FRP به‌شمار می‌آید.

براساس پیشنهاد کمیتهٔ ٤٤٠ مؤسسهٔ بتن آمریکا [11]، بیشینهٔ دما در زمان کاربرد مصالح FRP به دمای انتقال شیشه‌ای اپوکسی (T_g) محدود می‌شود. یادآور می‌شود، T_g دمایی است که در آن دما اپوکسی از حالت صلب به حالت انعطاف‌پذیر و خمیری تغییر حالت می‌دهد. شایان ذکر است، محدودیت‌های محافظه‌کارانه‌تری درمورد حداکثر دمای بهره‌برداری در کاربردهای مصالح FRP توسط انجمن بزرگراه‌های ایالتی و مدیران حمل‌ونقل آمریکا [12] درنظر گرفته شده‌است. طبق بررسی‌های انجام گرفته‌شده توسط انجمن بتن اروپا [13]، T_g اپوکسی مصرفی در ساخت FRP نباید کمتر از ٤٥ درجهٔ سانتی‌گراد باشد. از سویی دیگر آیلو و همکاران[14] توصیه کردند که T_g اپوکسی مورد استفاده، باید ۵ تا ۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد بیشتر از بیشینه دمای بهره‌برداری باشد.

خاطرنشان می‌سازد، در دماهای بالاتر از T_g، ویژگی‌های مکانیکی اپوکسی مانند مقاومت و سختی به‌شدت کاهش می‌یابد. با افزایش دما و گذر از T_g، ناگهان انرژی جنبشی مولکول‌های اپوکسی افزایش می‌یابد و روند خطی بودن تغییرات انرژی جنبشی برحسب افزایش دما بر هم می‌خورد و با شیب بیشتری پیش می‌رود. با افزایش جنبش مولکول‌ها، نیروی جاذبهٔ بین مولکولی کاهش می‌یابد و اپوکسی شکننده‌تر می‌شود [15].

بررسی‌های نووین و همکاران [16] نشان داد که با افزایش دما به بیشتر از T_g، ظرفیت باربری به‌شدت کاهش پیدا می‌کند. لئون و همکاران [17] از آزمون کشش دو طرفه (Double-Lap Shear) به‌منظور تعیین اثر دماهای بالا برروی چسبندگی FRP استفاده کردند. نتیجه‌های پژوهش آن‌ها، کاهش تنش قابل تحمل سامانه را در دماهای بالاتر از T_g را نشان داد. آن‌ها بیشترین مقاومت چسبندگی را در دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد گزارش کردند. نتیجه‌های آن‌ها هم‌خوان با یافته‌های بلونتروک و همکاران [18] و عطاری و توکلی‌زاده [19] بود. اثر مقاومت فشاری، دما و رطوبت سطحی بستر برروی مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP توسط ایمانی جاجرمی و همکاران [20] مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان داد که اثر دو عامل دما و رطوبت سطحی برروی میزان مقاومت چسبندگی بیشتر از مقاومت فشاری بستر است.

مایرز و همکاران [21] به‌منظور بررسی اثر شرایط محیطی برروی مقاومت چسبندگی ورق‌های CFRP از آزمایش‌های جدا کردن با کشش (Pull-off)، جدا کردن با پیچش (Twist-off) و خمش (Flexural) استفاده کردند. نتیجه‌ها نشان داد که ورق‌های FRP را می‌توان در بازهٔ دمایی ٤ تا ٤٩ درجهٔ سانتی‌گراد بدون نگرانی نصب کرد. اثر دماهای زیر صفر درجهٔ سانتی‌گراد روی مقاومت چسبندگی FRP نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است [22,23]. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که مطالعهٔ جامعی در زمینهٔ بررسی اثر دمای سطح بستر بتن و اپوکسی در هنگام نصب انجام نشده‌است.

باتوجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط فصلی گوناگون پروژه‌های مقاوم‌سازی، عملکرد سامانه‌های FRP می‌تواند تحت تأثیر زیادی قرار گیرد. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر دمای سطح بستر و اپوکسی برروی مقاومت چسبندگی ورق‌های GFRP نصب‌شده برروی بسترهای پایه‌سیمانی بوده‌است. به همین منظور، ١٤٤ آزمون جدا کردن با کشش (Pull-off Test: POT) و ١٤٤ آزمون جدا کردن با پیچش (Twist-off Test: TOT) برروی ۳۲ بستر پایه‌سیمانی انجام شد. به‌منظور بررسی اثر دمای سطح بستر و چسب اپوکسی برروی مقاومت چسبندگی، بستر و اپوکسی پیش از عملیات نصب ورق‌های GFRP در چهار دمای مختلف ۵، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفتند.

برنامه آزمایشگاهی

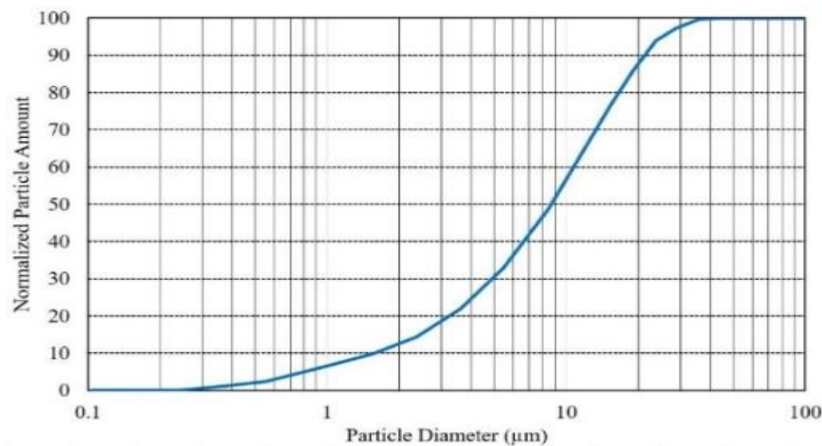
مصالح مصرفی

سیمان مصرفی در این پژوهش از نوع سیمان پرتلند تیپ ۱ می‌باشد که نمودار دانه‌بندی ذرات (PSD) آن و ترکیبات شیمیایی آن به‌ترتیب، در شکل (۱) و جدول (۱) آمده‌است.

ماسه‌ای که در این پژوهش برای ساخت بستر پایه‌سیمانی استفاده شد، ماسهٔ رودخانه‌ای با اندازهٔ بزرگ‌ترین دانه ٤/٧٥ میلی‌متر بود که نمودار دانه‌بندی آن در شکل (۲) آورده شده‌است.

در این پژوهش، ۳۲ نمونه بستر پایه‌سیمانی به ابعاد ٦٠×۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر مکعب براساس طرح اختلاط جدول (۲) ساخته شد. مقاومت فشاری، ضریب کشسانی، روانی (میز جریان)

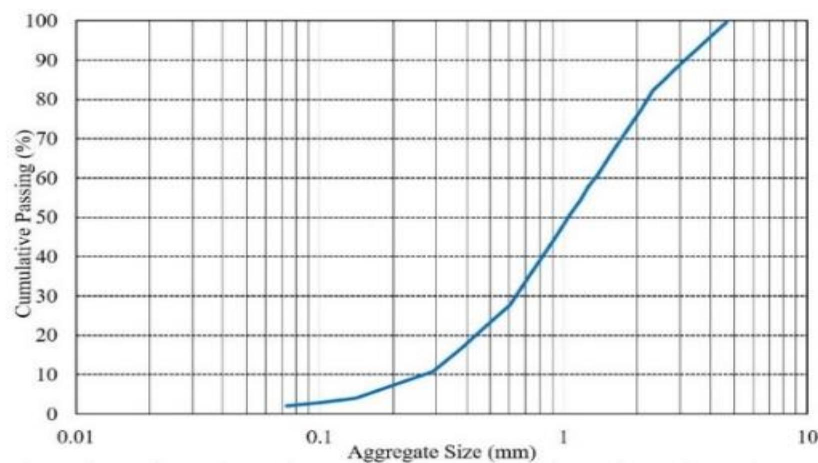
و تخلخل این نمونه‌ها در جدول (۳) آورده شده‌است. ویژگی‌های الیاف و اپوکسی مصرفی در جدول (٤) نشان داده شده‌است. خاطرنشان می‌سازد، پارچهٔ الیافی شیشه‌ای تک‌سویه در این پژوهش به‌کار گرفته شده‌است و هم‌چنین، دمای T_g اپوکسی براساس گزارش شرکت سازنده، ٤٥ درجهٔ سانتی‌گراد بود.



شکل ۱ نمودار دانه‌بندی ذرات سیمان مصرفی

جدول ۱ آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ یک مصرفی

نوع اکسید	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Other
میزان (٪)	۲۰/۹	٤/٥	۳/۸	٦۳/٥	۲/۷	۲/۰	۰/٥	۰/٤٥	۱/٦٥



شکل ۲ نمودار دانه‌بندی ماسهٔ مصرفی

جدول ۲ طرح اختلاط بستر پایه‌سیمانی تهیه‌شده

نسبت آب به سیمان (W/C)	نسبت ماسه به سیمان (S/C)	سیمان (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	آب (kg/m^3)
۰/٥٥	۲/۷٥	٥٥۹/۰۰	۱٥۳۷/۲٥	۳۰۷/٤٥

جدول ۳ ویژگی‌های مکانیکی بستر پایه‌سیمانی تهیه‌شده

روانی (%)	ضریب کشسانی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)		
		۲۸ روزه	۷ روزه	۳ روزه
۱۰۸	۳۳۱	۳۳/۷۵	۲۳/۰۷	۲۰/۸۱

جدول ٤ ویژگی‌های مکانیکی پارچهٔ الیافی و اپوکسی مصرفی

افزایش طول (%)	ضریب کشسانی (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	مصالح
۳/۰۰	۷۰/۰۰	۲۲۰۰/۰۰	الیاف شیشه
۲/٦۰	۲/۵۰	۵۵/۰۰	اپوکسی

شرایط دمایی

مقاومت چسبندگی ورق‌های GFRP در دو حالت مختلف دمایی زیر مورد بررسی قرار گرفت:

۱. دماهای گوناگون سطح بستر در هنگام نصب.

۲. دماهای گوناگون اپوکسی در هنگام نصب.

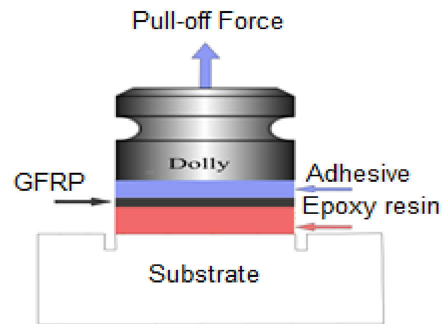
خاطرنشان می‌سازد، نمونه‌ای که در آن، هر دو دمای سطح بستر و اپوکسی در هنگام نصب ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد بود، به‌عنوان نمونهٔ مبنا تهیه و نام‌گذاری شد. برای شرایط دمایی حالت (۱)، نخست، نمونه‌ها قبل از نصب ورق GFRP به‌مدت ۵ روز درون سردخانه یا گرم‌خانه قرار گرفتند تا به دمای سطحی مورد نظر و به تعادل برسند. یادآور می‌شود، دماهای مورد بررسی ۵، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد بود. برای حالت (۲)، اجزای اپوکسی (رزین و سخت‌کننده) قبل از مصرف و اعمال برروی سطح بستر پایه‌سیمانی به‌مدت ۲۰ دقیقه در دمای مورد نظر قرار می‌گرفت. در این حالت، مطابق شرایط دمایی (۱)، دماهای مورد بررسی ۵، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد بود. شایان ذکر است، دمای ۵۰ و ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد به‌منظور بررسی اثر دماهای نزدیک و بالاتر از T_g اپوکسی درنظر گرفته شد.

آزمون جدا کردن با کشش (POT)

POT، نخستین بار، در دانشگاه کووین و به‌منظور تعیین مقاومت سطحی بتن انجام شد [24]. با گسترش کاربرد مصالح FRP و نیاز به آگاهی یافتن از کارایی این روش‌ها، کاربرد آن به‌منظور بررسی و ارزیابی مقاومت چسبندگی سیستم‌های FRP پیشنهاد شد [25]. لازم به ذکر است، از POT به‌منظور ارزیابی گونهٔ ۱ شکست بهره‌جویی می‌شود. در این روش یک پولک فولادی یا آلومینیومی بااستفاده از یک چسب مناسب و با مقاومت بالا به سطح بتن و یا FRP چسبانده می‌شود و سپس نیروی کششی به‌آرامی و تا زمان گسیختگی اعمال می‌شود [26,27]. این روش به‌عنوان یک آزمون نیمه‌مخرب شناخته می‌شود، به‌طوری‌که پس از انجام آزمایش، سطح مورد نظر به‌راحتی قابل تعمیر است. شایان ذکر است، این روش متأثر از عوامل مختلفی است که می‌توان به مشخصات مغزه‌گیری، ابعاد و جنس پولک و شرایط بارگذاری اشاره کرد [28]. براساس دستورالعمل‌های موجود، عمق مغزه باید بین ٦ تا ۱۲ میلی‌متر باشد [29] که در این پژوهش شیارهایی به عمق ٦ میلی‌متر ایجاد شد. هم‌چنین، از پولک‌های فولادی با قطر ٤۵ میلی‌متر استفاده شد. مقاومت چسبندگی POT بااستفاده از رابطهٔ (۱) به‌دست می‌آید [27].

$$f_p = \frac{4F_p}{\pi D^2} \quad (1)$$

در این رابطه، f_p، F_p و D به‌ترتیب، مقاومت POT، حداکثر نیروی کششی ثبت شده و قطر پولک است. شکل (۳) طرح‌واره‌ای از چیدمان POT و نحوهٔ اجرای آن را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

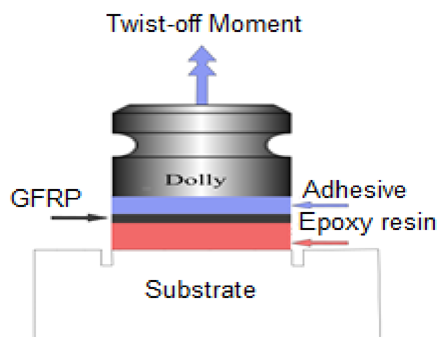
شکل ۳ چیدمان آزمایش POT: الف) طرح‌واره و ب) نحوهٔ اجرای آزمون

آزمون جدا کردن با پیچش (TOT)

یکی دیگر از آزمون‌هایی که برای بررسی مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP پیشنهاد شده‌است، TOT است که قادر به ارزیابی گونهٔ۲ـ شکست است [30]. روش انجام این آزمون مشابه POT است با این تفاوت که به‌جای اعمال نیروی کششی عمود بر سطح از گشتاور پیچشی در سطح برای ارزیابی مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP استفاده می‌شود. جذابیت این روش در دقت، سرعت انجام، سادگی، خرابی جزئی و هزینهٔ اندک انجام آن است که آن را در مقایسه با سایر روش‌های ارزیابی مقاومت چسبندگی می‌تواند متمایز سازد. باید دانست، مشابه POT، این آزمون را می‌توان برروی سطوح افقی و قائم انجام داد. مانند POT، عمق شیار و قطر پولک فولادی به‌ترتیب، ٦ و ٤٥ میلی‌متر انتخاب شد. مقاومت TOT بااستفاده از رابطهٔ (۲) به‌دست می‌آید [30].

$$f_t = \frac{16T}{\pi D^3} \quad (۲)$$

در این رابطه، f_t، T و D به‌ترتیب، مقاومت TOT، حداکثر گشتاور پیچشی ثبت‌شده در طول آزمون و قطر پولک است. در شکل (٤) نمایی از TOT به‌همراه نحوهٔ اجرای این آزمون آورده شده‌است. شکل (٥) محل نصب پولک‌های مورداستفاده در دو آزمون POT و TOT را برروی سطح ورق GFRP نصب‌شده روی بستر پایه‌سیمانی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، نتیجه‌های مقاومت چسبندگی POT و TOT براساس میانگین ۹ آزمونه ارائه می‌شود. این در حالی است که طبق استاندارد ASTM D4541 [25]، سه آزمونه برای یافتن میانگین مقاومت چسبندگی POT کفایت می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل ٤ چیدمان آزمایش TOT: الف) طرح‌واره و ب) نحوهٔ اجرای آزمون



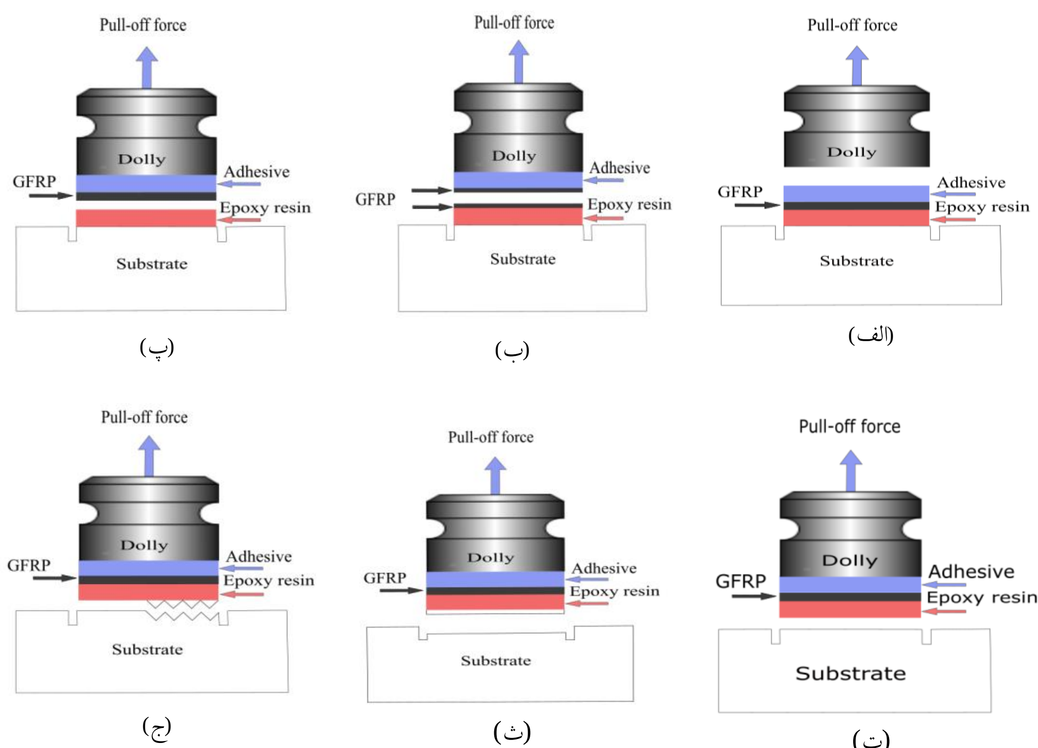
(الف) (ب)

شکل ٥ محل نصب پولک‌های مورد استفاده در آزمون‌ها: الف) POT و ب) TOT

گونه‌های گسیختگی

طبق اســتاندارد ASTM D7522 [23]، در آزمون POT، احتمال رخداد ٦ شــکل گونهٔ گســیختگی وجود دارد که در شــکل (٦) آمده‌است.

شکست نوع A، که در سطح تماس بین پولک و FRP رخ می‌دهد، بیانگر استفاده از چسب نامناسب برای اتصال پولک به سطح بستر است. لازم به ذکر است، مقاومت به‌دست‌آمده در این گونه شکست قابل‌قبول نیست و آزمون باید دوباره و در نقطه‌ای دیگر تکرار شود. شکست نوع B، نشانگر شکست بین لایه‌ای FRP است. این شکست می‌تواند ناشی از کیفیت پایین فرآیند تولید ورق FRP باشد. شکست در سطح تماس اپوکسی و ورق FRP نوع دیگر شکست می‌باشد و با حرف C نشان داده شده‌است. نوع دیگر گونهٔ شکست که در سطح تماس بین اپوکسی و بستر پایه‌سیمانی رخ می‌دهد و به شکست سطح تماس اشاره دارد با حرف E نشان داده می‌شود. این نوع شکست می‌تواند ناشی از انتخاب نامناسب چسب، ترکیب ناقص چسب و عمل‌آوری نامناسب آن و هم‌چنین کاستی‌های اجرایی باشد. پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که وجود رطوبت در سطح تماس بین اپوکسی و بستر پایه‌سیمانی و هم‌چنین تغییرات دمایی از عوامل ایجاد چنین گونه شکستی می‌باشد [31,32]. شکست پیوستگی بستر پایه‌سیمانی، گونهٔ G، مطلوب‌ترین نوع گونهٔ شکست است و در این حالت می‌توان ادعا کرد که FRP نقش مقاومت و به‌سازی خود را به‌خوبی انجام خواهد داد. شکست نوع G، بیانگر این موضوع است که مقاومت چسبندگی FRP از مقاومت بستر بیشتر است و بستر سیمانی ضعیف‌ترین عضو این سامانه است. شکست نوع F، معرف حالت شکست ترکیبی است که در آن بخشی از بستر پایه‌سیمانی و بخشی از چسب سطح تماس قلوه‌کن می‌شود. به عبارت دیگر، این نوع شکست تلفیقی از گونه‌های شکست E و G است. به‌نظر می‌رسد که گونه‌های شکست مشابهی را می‌توان برای TOT درنظر گرفت.



شکل ٦ انواع گونه‌های گسیختگی براساس ASTM-D7522-15 [۲۰]: الف) شکست نوع A، ب) شکست نوع B، پ) شکست نوع C، ت) شکست نوع E، ث) شکست نوع G، ج) شکست نوع F

تجزیه و تحلیل آماری

در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی اثر متغیرهای مستقل (دمای سطح بستر و چسب اپوکسی) بر متغیرهای وابسته (مقاومت چسبندگی POT و TOT) از تحلیل آماری استفاده شد. به همین منظور، آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) باا ستفاده از نرم‌افزار SPSS نسخهٔ ۲۶ انجام شد. تحلیل واریانس از آن دسته روش‌های آماری است که می‌تواند اختلاف بین گروه‌ها یا دسته‌ها را بررسی کند. اساس این روش، تفکیک پراکندگی داده‌ها به چند بخش است. در این آزمون فرضیات زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱. فرض صفر (H_0): میانگین متغیر در گروه‌های آماری برابر است.

۲. فرض مقابل صفر (H_1): حداقل دو گروه آماری وجود دارد که میانگین آن‌ها با یکدیگر برابر نیست.

لازم به ذکر است، چنان‌چه سطح معناداری این آزمون از مقدار خطای ۵ درصد کمتر باشد، فرض صفر رد و در غیر این صورت فرض صفر تأیید می‌گردد.

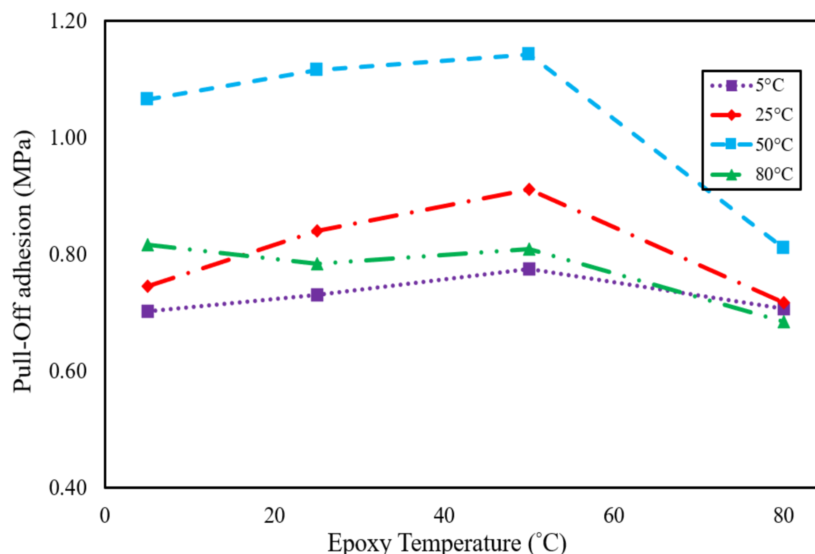
نتیجه‌ها

مقاومت چسبندگی POT

نتیجه‌های POT در جدول (۵) آمده‌است. یادآور می‌شود، نتیجه‌ها براساس میانگین ۹ آزمونه گزارش شده‌است. در این جدول، مقادیر میانگین مقاومت چسبندگی POT، انحراف معیار و ضریب تغییرات به‌ترتیب، با $\bar{f}_p$، σ و Cv نشان داده شده‌است. اسامی نمونه‌ها با دو حرف X-Y نشان داده شده‌است که در آن X بیانگر دمای سطح بستر و Y بیانگر دمای اپوکسی در هنگام نصب می‌باشد. به‌عنوان مثال نمونه‌ای که دارای دمای سطح ۵ و دمای اپوکسی ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد است، با نماد ۵۰–۵ نشان داده شده‌است. براساس نتیجه‌های نشان داده شده در جدول (۵)، مقاومت چسبندگی نمونهٔ مبنا (نمونهٔ ۲۵–۲۵) ۰/۸۴ مگاپاسکال است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که با کاهش دمای سطحی بستر از ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد، مقاومت چسبندگی کاهش می‌یابد. با این وجود، افزایش دمای اپوکسی تا حدی می‌تواند میزان این افت مقاومت را کاهش دهد. برای نمونهٔ ۲۵–۵ افت ۱۳ درصدی مقاومت POT دیده می‌شود. این در حالی است که با افزایش دمای اپوکسی به ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد (۵–۵۰)، مقاومت چسبندگی ۸ درصد افت را تجربه کرده‌است. دلیل این میزان افزایش مقاومت، نسبت‌به حالت قبل را می‌توان بهبود ویژگی‌های مکانیکی، T_g و هم‌چنین، درجهٔ شبکه‌بندی اپوکسی در دمای نزدیک به T_g اپوکسی دانست. باتوجه به جدول (۵)، بیشترین مقاومت چسبندگی POT مربوط به نمونهٔ ۵۰–۵۰ است که حدود ۳۶ درصد در مقایسه با نمونهٔ مبنا مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. این مشاهده با نتیجه‌های کارباس و همکاران [33] هم‌خوانی دارد. آن‌ها نشان دادند که دمای عمل‌آوری بین ٤۰ تا ٦۰ درجهٔ سانتی‌گراد، موجب افزایش مقاومت، سختی و سایر خصوصیات مکانیکی اپوکسی می‌شود. لازم به ذکر است، با افزایش دمای سطح بستر و یا اپوکسی به فراتر از T_g، مقاومت چسبندگی و ویژگی‌های مکانیکی چسب به‌شدت کاهش می‌یابد. هم‌چنین، برای نمونه‌های با دمای سطحی ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد، کاهش ۳ تا ۱۹ درصدی در مقاومت چسبندگی مشاهده می‌شود. افزون بر این، در دماهای بالا به‌دلیل اختلاف انبساط دمایی مصالح به‌کار گرفته شده در سامانهٔ تقویتی (بستر پایه‌سیمانی، پارچهٔ الیافی و اپوکسی)، می‌توان انتظار تنش‌های مخرب را داشت که در میزان مقاومت چسبندگی تأثیرگذار هستند.

جدول ۵ نتیجه‌های POT

گروه	$\bar{f}_p$ (MPa)	σ (MPa)	Cv (%)
٥–٥	۰/۷۰	۸/۰۲	۰/۱۳
٥–٢٥	۰/۷۳	٢٦/٨٤	۰/۲۱
٥–٥٠	۰/۷۸	٢٣/٥٦	۰/۱۸
٥–٨٠	۰/۷۱	١٣/٥٨	۰/۱۰
٢٥–٥	۰/۷٥	١١/٧٨	۰/۰۹
٢٥–٢٥ (مبنا)	۰/٨٤	٢١/٨٩	۰/۱۸
٢٥–٥٠	۰/۹۱	۹/۰۷	۰/۰۸
٢٥–٨٠	۰/۷۲	١٨/٢٦	۰/۱۳
٥٠–٥	۱/۰۷	١٠/٢٦	۰/۱۱
٥٠–٢٥	۱/۱۲	١٠/٩٣	۰/۱۲
٥٠–٥٠	۱/١٤	١٢/٤٦	۰/١٤
٥٠–٨٠	۰/٨١	١٧/٤١	۰/۱۳
٨٠–٥	۰/٨٢	١١/٤٠	۰/۰۹
٨٠–٢٥	۰/٧٨	٣٤/١٥	۰/۲۷
٨٠–٥٠	۰/٨١	١٤/٧٣	۰/۱۲
٨٠–٨٠	۰/٦٨	١٩/٣٤	۰/۱۳



شکل ۷ نمودار تغییرات میانگین مقادیر چسبندگی POT برای بسترهایی با دمای مختلف دربرابر تغییرات دمای اپوکسی

جدول ٦ درصد تغییرات مقاومت چسبندگی POT گروه‌های مختلف نسبت‌به نمونهٔ مبنا (۲۵ـ۲۵)

(دمای اپوکسی ـ دمای بستر)

نمونه	۵ـ۵	۵ـ۲۵	۵ـ۵۰	۵ـ۸۰	۲۵ـ۵	۲۵ـ۲۵	۲۵ـ۵۰	۲۵ـ۸۰
درصد اختلاف مقاومت	−۱٦/٤۱	−۱۳/۰۵	−۷/۷۰	−۱۵/۸۹	−۱۱/۲۷	−	۸/٤۲	−۱٤/٦۹
نمونه	۵۰ـ۵	۵۰ـ۲۵	۵۰ـ۵۰	۵۰ـ۸۰	۸۰ـ۵	۸۰ـ۲۵	۸۰ـ۵۰	۸۰ـ۸۰
درصد اختلاف مقاومت	۲٦/۷۹	۳۲/۹۳	۳۵/۹۸	−۲/۵٦	−۲/۸۵	−٦/٦۹	−۳/۷٤	−۱۸/۵۰

شکل (۷) تغییرات مقاومت POT را با در نظر گرفتن دمای اپوکسی نشان می‌دهد. در این شکل، هر منحنی مربوط به یک دمای سطح بستر مشخص است و محور افقی و قائم به‌ترتیب، نشان‌دهندهٔ دمای اپوکسی در زمان نصب GFRP و مقاومت چسبندگی POT برحسب مگاپاسکال است.

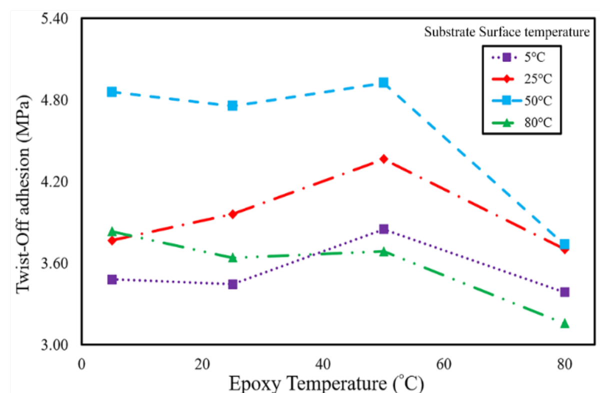
در جدول (٦)، تغییرات مقاومت POT نمونه‌های مختلف نسبت‌به نمونهٔ مبنا را می‌توان مشاهده کرد. بیشترین افزایش و کاهش میزان مقاومت چسبندگی، برابر با ۳۵/۹۸ و ۱۸/۵۱ درصد می‌باشد که به‌ترتیب، مربوط به نمونه‌های ۵۰–۵۰ و ۸۰–۸۰ است.

مقاومت چسبندگی TOT

نتیجه‌های TOT در جدول (۷) و شکل (۸) آمده‌است. مشابه نتیجه‌های POT، این مقدارها براساس میانگین ۹ آزمایش TOT گزارش شده‌است. همان‌گونه که در جدول (۷) قابل‌مشاهده‌است، کاهش مقاومت TOT برای نمونه‌های GFRP نصب‌شده برروی سطوح با دمای ۵ درجهٔ سانتی‌گراد، پس از استفاده از اپوکسی با دماهای ۵، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد به‌ترتیب، برابر ۱۲، ۱۳، ۳ و ۱۵ درصد است. این نتیجه‌ها نشان می‌دهد، برای بسترهایی با دمای پایین‌تر از دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد (دمایی محیطی پایین‌تر از محیط استاندارد آزمایشگاهی)، با پیش‌گرمایش اپوکسی می‌توان تا حدی اثر منفی دمای سطح بستر را جبران کرد. درصورتی‌که حرارت اعمالی به اپوکسی، بیشتر از میزان T_g آن باشد، به‌دلیل ایجاد اثرات منفی برروی اپوکسی مانند کاهش ظرفیت باربری و سختی، مقاومت چسبندگی کاهش خواهد یافت. هم‌چنین، جدول (۷) نشان می‌دهد که در دمای سطحی ۲۵ و ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد، افزایش دمای اپوکسی تا ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد موجب افزایش میزان چسبندگی می‌شود. از سوی دیگر، نصب GFRP در دمای ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد سبب کاهش مقاومت و عملکرد آن می‌شود. در این حالت، بسته به دمای

اپوکسی در زمان استفاده، مقاومت TOT بین ۳ تا ۲۰ درصد نسبت‌به شرایط محیطی آزمایشگاه کاهش می‌یابد.

شکل (۸)، تغییرات مقاومت TOT را با درنظر گرفتن دمای اپوکسی نشان می‌دهد. در این شکل، محور افقی نشان‌دهندهٔ دمای اپوکسی و محور عمودی نشان‌دهندهٔ میزان مقاومت چسبندگی TOT است.



شکل ۸ نمودار تغییرات میانگین مقادیر چسبندگی TOT برای بسترهایی با دمای مختلف دربرابر تغییرات دمای اپوکسی

درصد تغییرات مقاومت TOT گروه‌های مختلف، نسبت‌به نمونهٔ مبنا در جدول (۸) نشان داده شده‌است. براساس نتیجه‌های این جدول، بیشترین افزایش اختلاف چسبندگی مربوط به نمونهٔ ۵۰ـ۵۰ است که مقاومت چسبندگی ۲۴ درصد افزایش یافته‌است. این در حالی است که نمونهٔ ۸۰-۸۰ بیش از ۲۰ درصد افت مقاومت چسبندگی را تجربه کرده‌است و بیشترین کاهش مقاومت را نسبت‌به نمونهٔ مبنا داشته‌است.

با مقایسهٔ نتیجه‌های به‌دست‌آمده از دو روش POT و TOT و همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، TOT مقادیر بیشتری را برای مقاومت چسبندگی نشان می‌دهد که این موضوع، هم‌خوان با نتیجه‌های گزارش شدهٔ پیشین است [34]. البته باید توجه داشت که جنس و توزیع تنش اعمالی به سطح تماس در دو روش با هم متفاوت است.

شایان ذکر است، مدل‌های ریاضی برای دو روش POT و TOT و براساس نتیجه‌های به‌دست‌آمده از این پژوهش ارائه شده‌است. در این روابط، دمای سطح بستر و همچنین دمای چسب اپوکسی در هنگام استفاده به‌عنوان متغیرهای مستقل و مقادیر POT و TOT به‌عنوان متغیرهای وابسته درنظر گرفته شده‌است. برپایهٔ تحلیل‌های درون‌یابی، رابطه‌های (۳) و (٤)، به‌ترتیب، روابط پیشنهادی برای پیش‌بینی مقادیر مقاومت POT و TOT با درنظر گرفتن دمای سطح بستر و اپوکسی است.

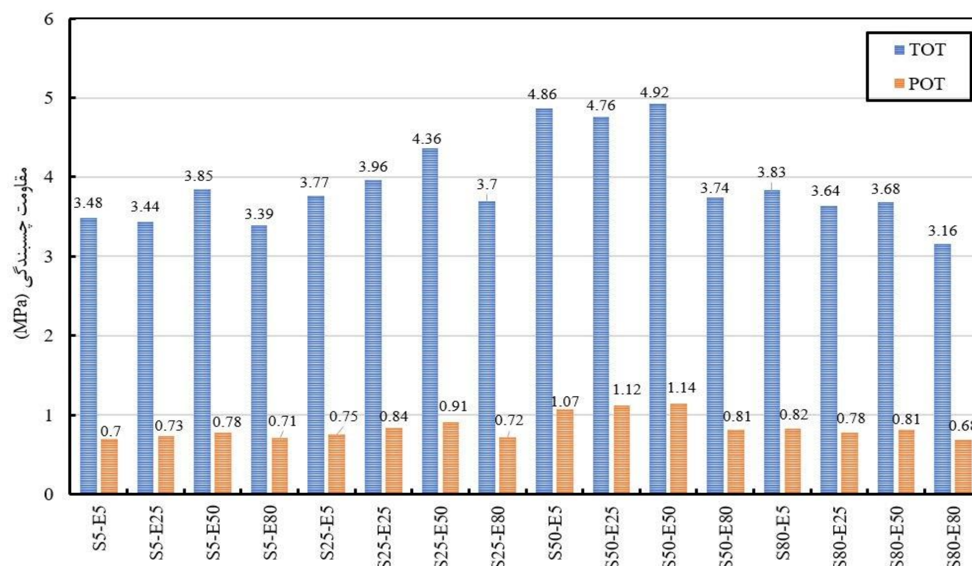
$$f_p = 0.74{T_S}^{0.6}{T_E}^{-0.026} \quad (۳)$$

$$f_t = 3.72{T_S}^{0.038}{T_E}^{-0.023} \quad (٤)$$

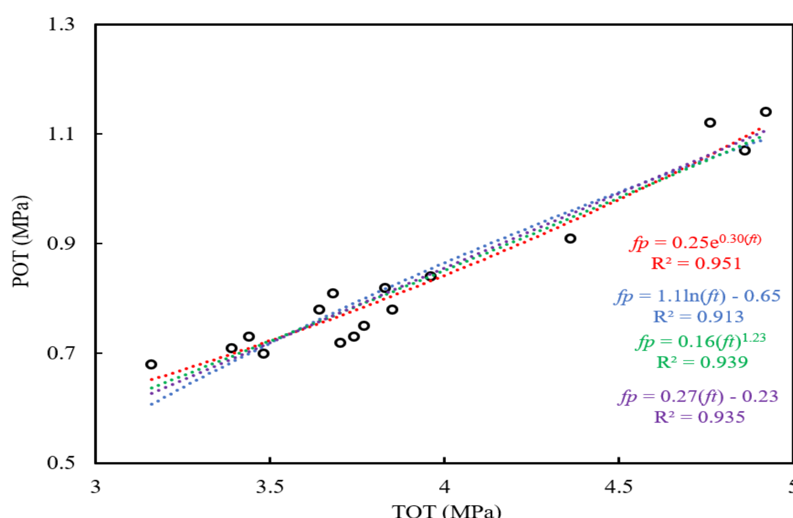
لازم به ذکر است، در رابطه‌های بالا T_S و T_E، به‌ترتیب، نشان‌دهندهٔ دمای بستر و اپوکسی در هنگام نصب می‌باشد. به‌منظور ارزیابی میزان خطای روابط پیشنهادی و مقادیر آزمایشگاهی از چهار روش مختلف میانگین مربع خطاها (RSME)، میانگین خطای مطلق (MAE)، خطای مطلق تجمعی (IAE) و ضریب تعیین (R-Squared) استفاده شد. مقادیر RSME، MAE، IAE و R-Squared به‌ترتیب، برای POT، ۰/۳۸۲، ۰/۰۲۱، ۰/۱۳۱ و ۰/۹۸۵ می‌باشد درحالی‌که این مقادیر برای TOT، به‌ترتیب، ۰/۳٤٦، ۰/۰۱۵، ۰/۱۰٤ و ۰/۹۷٤ به‌دست آمد. همچنین نتیجهٔ انجام درون‌یابی غیرخطی بین داده‌های این دو آزمایش نشان از وجود یک رابطهٔ نمایی بین آن‌ها دارد که در شکل (۱۰) آورده شده‌است.

جدول ۸ درصد تغییرات مقاومت چسبندگی TOT گروه‌های مختلف نسبت‌به نمونهٔ مبنا (۲۵ـ۲۵)
(دمای اپوکسی ـ دمای بستر)

نمونه	۵ـ۵	۵ـ۲۵	۵ـ۵۰	۵ـ۸۰	۲۵ـ۵	۲۵ـ۲۵	۲۵ـ۵۰	۲۵ـ۸۰
اختلاف مقاومت	-۱۲/۱۱	-۱۳/۰۲	-۲/۷۹	-۱٤/٤۹	-٤/۹۰	-	۱۰/۲۱	-٦/٤۹
نمونه	۵۰ـ۵	۵۰ـ۲۵	۵۰ـ۵۰	۵۰ـ۸۰	۸۰ـ۵	۸۰ـ۲۵	۸۰ـ۵۰	۸۰ـ۸۰
اختلاف مقاومت	۲۲/٦۹	۲۰/۰۹	۲٤/۳۳	-۵/٦٤	-۳/۲۱	-۸/۰۸	-٦/۹۵	-۲۰/۲۹



شکل ۹ مقایسهٔ مقاومت چسبندگی بین دو روش TOT و POT



شکل ۱۰ رابطهٔ مقاومت چسبندگی بین دو روش TOT و POT

گونه‌های گسیختگی

نتیجه‌های POT و TOT نشان داد، دمای سطح بستر و اپوکسی علاوه‌بر تأثیر برروی مقاومت چسبندگی می‌تواند برروی گونه‌های شکست نیز اثرگذار باشد. به‌طور کلی، در این پژوهش، سه گونهٔ شکست زیر هنگام انجام آزمایش‌ها مشاهده شد:

۱. شکست پیوستگی بستر سیمانی (گونه G)

۲. شکست سطح تماس (گونه E)

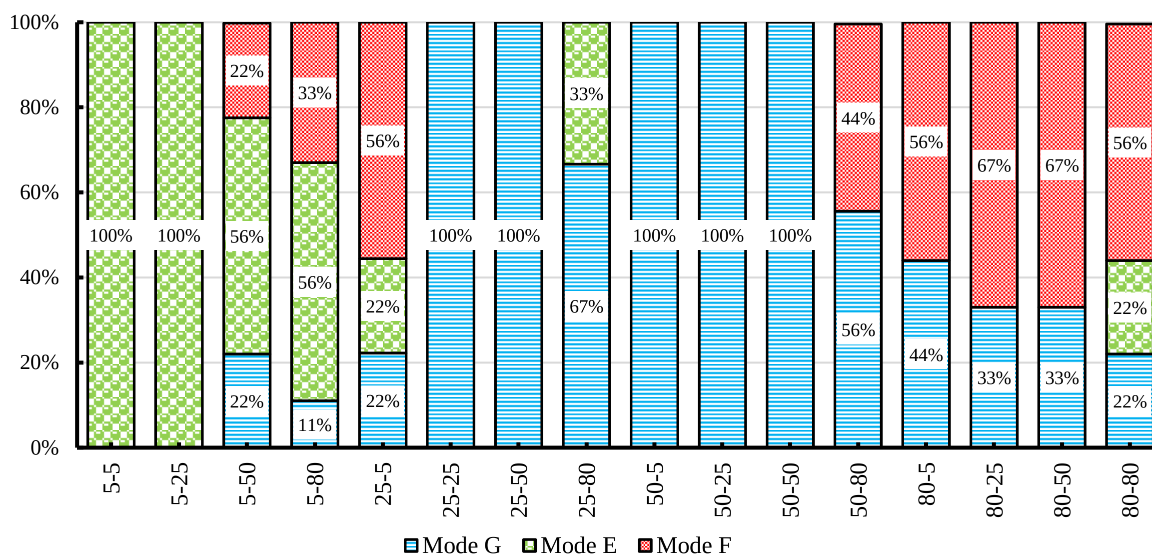
۳. شکست ترکیبی (گونه F)

که در شکل (۱۱) نشان داده شده‌است.

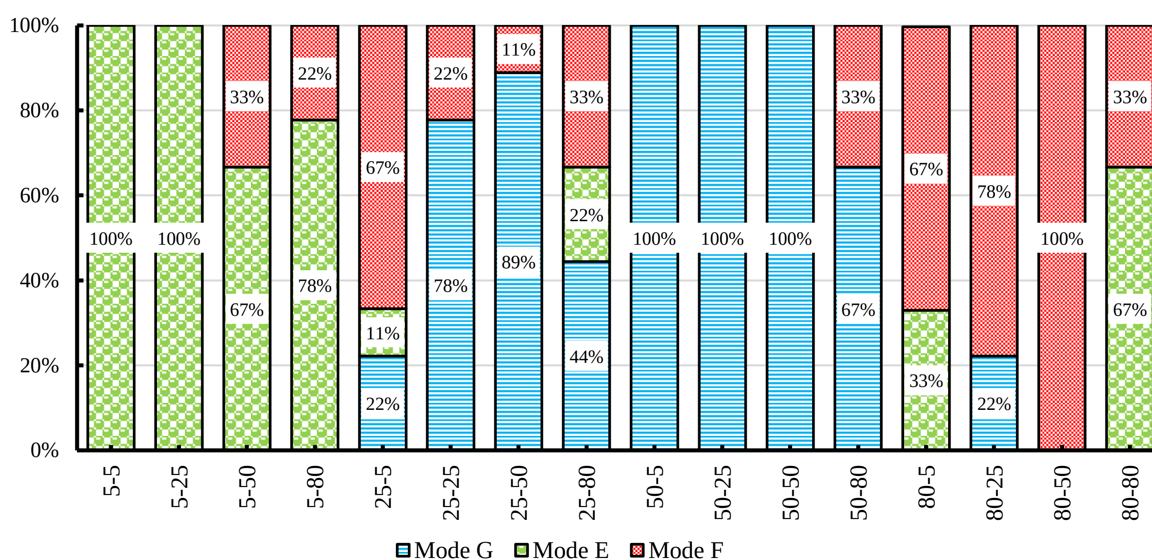
شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به‌ترتیب، درصد گونه‌های شکست مشاهده‌شده را برای POT و TOT نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش دمای سطح بستر از ۵ به ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد، درصد گونه‌های شکست نوع G افزایش یافته‌است. یادآور می‌شود، گونهٔ شکست G، بیانگر شکست مطلوب سیستم FRP می‌باشد. با افزایش دمای سطح بستر به فراتر از T_g اپوکسی، درصد گونه‌های شکست نوع F و E افزایش یافته‌است. هم‌چنین با مقایسهٔ شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌توان به این نکته اشاره کرد که درصد گونه‌های شکست از نوع F برای TOT بیشتر از POT می‌باشد.



شکل ۱۱ انواع شکل گونه‌های شکست: (الف) بستر سیمانی (G)، (ب) سطح تماس (E) و (پ) ترکیبی (F)



شکل ۱۲ درصد گونه‌های شکست نمونه‌های مختلف در POT



شکل ۱۳ درصد گونه‌های شکست نمونه‌های مختلف در TOT

جدول ۹ نتایج آزمون ANOVA برروی مقاومت چسبندگی POT و TOT

	مجموع مربعات		درجهٔ آزادی	میانگین مربعات		سطح معناداری	
اثر	POT	TOT		POT	TOT	POT	TOT
دمای بستر (T_s)	۱/۶۵۲	۲۲/۰۴۲	۳	۰/۵۵۱	۷/۳۴۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
دمای اپوکسی (T_E)	۰/۷۸۴	۱۰/۴۲۵	۳	۰/۲۶۱	۳/۴۷۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
برهم‌کنش دوگانهٔ دمای بستر و اپوکسی ($T_s \times T_E$)	۱۰۱/۸۳۳	۲۲۶۶/۷۸۱	۱۶	۶/۳۶۵	۱۴۱/۶۷۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

تجزیه و تحلیل آماری

براساس نتایج آزمون ANOVA و سطوح معناداری به‌دست‌آمده در جدول (۹)، می‌توان به این نکته اشاره کرد که دمای سطح بستر، دمای چسب اپوکسی و هم‌چنین برهم‌کنش آن‌ها برروی مقادیر چسبندگی POT و TOT تأثیر معنی‌داری دارند. شایان ذکر است، نتایج این بخش منطبق با نتایج ایمانی جاجرمی و همکاران [20] است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حا ضر، اثر دمای سطح ب ستر و اپوک سی در هنگام ن صب ورق‌های GFRP برروی مقاومت چ سبندگی باا ستفاده از دو آزمون POT و TOT مورد برر سی قرار گرفته‌ا ست. در ادامه به مهم‌ترین نتیجه‌های به‌د ست‌آمده برپایهٔ نمونه‌های برر سی‌ شده اشاره می‌شود:

۱. کاهش دمای سطحی بستر از ۲۵ به ۵ درجهٔ سانتی‌گراد، موجب افت ۸ تا ۱۶ درصدی مقاومت چسبندگی POT و افت ۳ تا ۱۴ درصدی مقاومت چسبندگی TOT می‌شود.

۲. نصب ورق‌های GFRP برروی بسترهایی با دمای بستر بالا (۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد) به‌دلیل افزایش نرخ عمل‌آوری و ویژگی‌های اپوکسی، موجب افزایش ۳۳ و ۲۰ درصدی مقاومت چسبندگی POT و TOT می‌شود. افزایش بیشتر دما سبب کاهش چسبندگی می‌شود، به‌طوری‌که برای نمونه‌های با دمای بستر ۸۰ درجهٔ سانتی‌گراد، میزان کاهش مقاومت چسبندگی برای دو روش POT و TOT به‌ترتیب، ۷ و ۸ درصد بود.

۳. برای بسترهایی با دمای کمتر از دمای استاندارد آزمایشگاهی، با افزایش دمای چسب تا کمتر از T_g اپوکسی، می‌توان اثر منفی دمای پایین سطح بستر را تا حدی جبران کرد.

٤. نتیجه‌های دو روش POT و TOT نشان داد، برای بسترهایی با دمای نزدیک به T_g اپوکسی، گرم کردن اپوکسی تا دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به‌دلیل افزایش ویژگی‌های مکانیکی، سبب افزایش مقاومت سامانهٔ تقویتی GFRP می‌شود.

۵. برای بسترهایی که دمای سطحی بیشتری از T_g اپوکسی دارد، کاربرد اپوکسی با دمای پایین‌تر در هنگام نصب، می‌تواند در عملکرد سامانهٔ تقویتی GFRP تأثیر مثبت داشته باشد. مقاومت چسبندگی بستر ۸۰ درجهٔ سانتی‌گرادی، هنگامی‌که از چسب ۵ درجهٔ سانتی‌گراد به‌جای چسب ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد استفاده شود، ۵ درصد افزایش نشان می‌دهد.

٦. بااستفاده از تحلیل‌های آماری و درون‌یابی خطی و برپایهٔ نتیجه‌های آزمایشگاهی گزارش‌شده در این پژوهش، روابطی به‌منظور پیش‌بینی میزان چسبندگی POT و TOT ارائه شد.

۷. براساس نتیجه‌های آزمایشگاهی و تحلیل درون‌یابی غیرخطی انجام شده، وجود یک رابطه نمایی بین دو روش POT و TOT تأیید شد.

۸. باتوجه به بستر، پارچه الیافی شیشه‌ای، اپوکسی و بازهٔ دمایی مورد بررسی در این پژوهش، سه گونه شکست مشاهده شد.

۹. دمای بستر نزدیک به ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد، گونهٔ شکست G (گونهٔ قابل‌قبول).

۱۰. دمای فراتر از T_g اپوکسی، افزایش گونه‌های شکست E و F (افت در عملکرد چسبندگی اپوکسی به بستر).

۱۱. نتایج تحلیل آماری ANOVA نشان داد که دمای سطح بستر و اپوکسی، دو عامل تأثیرگذار بر مقاومت چسبندگی سیستم‌های FRP می‌باشد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد به‌عنوان بخشی از طرح شمارهٔ ۵۲۰۰۸ انجام گرفته‌است. نویسندگان از همکاری‌های پرسنل آزمایشگاه سازهٔ گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد و مؤسسهٔ تحقیقاتی پرطاووس کمال تشکر را دارند.

مراجع

1. Saadatmanesh, H., and Malek, A. M., "Design Guidelines for Flexural Strengthening of RC Beams with FRP Plates", *Journal of Composites for Construction,* Vol. 2, No. 4, pp. 158-164, (1998).
2. Mostofinejad, D., and Hosseini, S. J., "Simulating FRP Debonding from Concrete Surface in FRP Strengthened RC Beams: A Case Study", *Scientia Iranica, International Journal of Science and Technology, Transactions A, Civil Engineering,* Vol. 24, No. 2, pp. 452-456, (2017).
3. Khorasani, A. M., Esfahani, M. R., and Sabzi, J., "The Effect of Transverse and Flexural Reinforcement on Deflection and Cracking of GFRP Bar Reinforced Concrete Beams", *Composites Part B: Engineering,* Vol. 161, No. 3 ,pp. 530-546, (2019).
4. Blackburn, BP., Tatar, J., Douglas, EP., and Hamilton, HR., "Effects of Hygrothermal Conditioning on Epoxy Adhesives Used in FRP Composites", *Construction and Building Materials,* Vol. 96, No. 10, pp. 679-689, (2015).
5. Djouani, F., Connan, C., Delamar, M., Chehimi, MM., and Benzarti, K., "Cement Paste-Epoxy Adhesive Interactions", *Construction and Building Materials,* Vol. 25, No. 2, pp. 411-423, (2011).
6. Stewart, A., "Study of Cement-Epoxy Interfaces, Accelerated Testing, and Surface Modification", PHD Dissertation, University of Florida, Gainesville, FL, (2012).
7. Chen, C., Li, X., Zhao, D., Huang, Z., Sui, L., and Xing, F., "Mechanism of Surface Preparation on FRP-Concrete Bond Performance: A Quantitative Study", *Composites Part B: Engineering,* Vol. 163, No. 4, pp. 193-206, (2019).
8. Varun, N., Sudarshan, G., Shivaraj, A., and Sridevi, G., "Rehabilitation and Retrofitting of Structural Elements Using Various Fibers", *Resilient Infrastructure,* Vol. 202, No. 1, pp. 187-193, (2022).
9. Chothe, O.K. and Agrawal, V. M., "An Experimental Investigation on Applications of Fiber-Reinforced Composites for Rehabilitation of Concrete Beams", *Resilient Infrastructure,* Vol. 202, No. 1, pp. 415-425, (2022).
10. Zhang, P., Lv, X., Zhang, H., Liu, Y., Chen, B., Gao, D., and Sheikh, SA., "Experimental Investigations of GFRP-Reinforced Columns with Composite Spiral Stirrups under Concentric Compression", *Journal of Building Engineering,* Vol. 46, No. 4, pp. 103768, (2022).
11. ACI Committee 440., "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440. 2R-17)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (2017).
12. AASHTO-FRPS-1., "Guide Specifications for Design of Bonded FRP Systems for Repair and Strengthening of Concrete Bridge Elements", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., (2010).

13. *fib* Bulletin 14., "Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. Technical Report on the Design and Use of Externally Bonded Fiber Reinforced Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures", International federation for structural concrete (fib), Lausanne, Switzerland, (2001).
14. Aiello, M., Frigione, D., and Acierno, D., "Effects of Environmental Conditions on Performance of Polymeric Adhesives for Restoration of Concrete Structures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 185-189, (2002).
15. Banea, M., Silva, LFM., and Campilho, R., "Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 26, No. 7, pp. 939-953, (2012).
16. Nguyen, T., Bai, Y., Zhao, X., and Al-Mahaidi, R., "Mechanical Characterization of Steel/CFRP Double Strap Joints at Elevated Temperature", *Composite Structure*, Vol. 93, No. 6, pp. 1604-1612, (2011).
17. Leone, M., Matthys, S., and Aiello, MA., "Effect of Elevated Service Temperature on Bond between FRP EBR Systems and Concrete", *Composites Part B,* Vol. 40, No. 1, pp. 85-93, (2009).
18. Blontrock, H., Taerwe, L., and Vanwalleghem, H., "Bond Testing of Externally Glued FRP Laminates at Elevated Temperature", international conference on bond in concrete-from research to standard, Budapest, Hungary, (2002).
19. Attari, B., and Tavakkolizadeh, M., "An Experimental Investigation on Effect of Elevated Temperatures on Bond Strength between Externally Bonded CFRP and Concrete", *Steel and Composite Structures,* Vol. 32, No. 5, pp. 559-569, (2019).
20. Imani Jajarmi, P., Tavakkolizadeh, MR., and Youssefi, A., "Effect of Temperature and Moisture on the Bond Strength between FRP Laminates and Cement-Based Mortar Substrates", *Structural Concrete,* Vol. 22, No. 6, pp. 1-23, (2022).
21. Myers, J., and Ekenel, M., "Effect of Environmental Conditions on Bond Strength between CFRP Laminate and Concrete Substrate", Center for Infrastructure Engineering Studies (CIES), *Special Publication,* Vol. 230, No. 1, pp. 1571-1592, (2005).
22. Al-Shawaf, A., Al-Mahaidi, R., and Zhao, X., "Study on Bond Characteristics of CFRP/Steel Double Lap Shear Joints at Subzero Temperature Exposure", 3rd international conference on FRP composites in civil engineering (CICE), Miami, FL, (2006).
23. Kim, Y., Hossain, M., and Yoshitake, I., "Cold Region Durability of a Two-Part Epoxy Adhesive in Double-Lap Shear Goints: Experiment and Model Development", *Journal of Construction and Building Materials,* Vol. 36, No. 11, pp. 295-304, (2012).
24. Malhotra, V.M., and Carino, N.J., "Non-Destructive Testing of Concrete", Boca Raton, New York, Washington D.C. 2nd Edition, CRC Press LLC, (2004).
25. ASTM Standard D4541-17., "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers, West Conshohocken, PA, (2017).
26. ASTM Standard D7522-15., "Standard Test Method for Pull-Off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete Substrate, West Conshohocken, PA, (2015).
27. ASTM Standard D7234-19., "Standard Test Method for Pull-Off Adhesion Strength of

Coatings on Concrete Using Portable Pull-Off Adhesion Testers", West Conshohocken, PA, (2019).

28. CNR-DT 200., "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures", National Research Council, Italy, (2004).
29. BS EN 1542., "Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Measurement of Bond Strength by Pull-Off", British Standard Institution, (1999).
30. Naderi, M., "New Twist-Off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 35, No. 6, pp. 602-608, (2007).
31. Shrestha, J., Ueda, T., and Zhang, D., "Durability of FRP Concrete Bonds and its Constituent Properties under the Influence of Moisture Conditions", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 201-215, (2015).
32. Ouyang, Z., and Wan, B., "Experimental and Numerical Study of Water Effect on Bond between FRP and Concrete in Moist Environments", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 27, No. 2, pp. 205-223, (2008).
33. Carbas, RJC., Marques, EAS., Da Silva, LFM. and Lopes, AM., "Effect of Cure Temperature on the Glass Transition Temperature and Mechanical Properties of Epoxy Adhesives", *The Journal of Adhesion*, Vol. 90, No. 1, pp. 104-119, (2014).
34. Ekenel, M., Myers, J. and Khataukar, A., "Effect of Environmental Conditions During Installation Process on Bond Strength between CFRP Laminate and Concrete Substrate", *3rd international conference composites in construction, Lyon, France*, (2005).